

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
институт
Кафедра «ЭТ и ЭТ»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Н. Тимофеев
« _____ » _____ 2016 г.

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»
код и наименование специальности

13.03.02.11 «Электротехнологические установки и системы»
профиль подготовки

Методика проектирования МГД-перемешивателей жидких металлов.

Пояснительная записка

Руководитель	_____	зав. кафедрой, д.т.н.	В. Н. Тимофеев
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____	студент гр. ФЭ 12-07Б	А. А. Огнев
	подпись, дата		инициалы, фамилия

Красноярск 2016

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
институт
Кафедра «ЭТ и ЭТ»
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.Н. Тимофеев
« _____ » _____ 2016 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме бакалаврской работы**

Студенту Огневу Андрею Александровичу

фамилия, имя, отчество

Группа ФЭ12-07Б Направление (специальность) 13.03.02.11

номер

код

Электротехнологические установки и системы

Наименование

Тема выпускной квалификационной работы «Методика проектирования МГД-перемешивателей жидких металлов»

Утверждена приказом по университету № 5283/с от 19 апреля 2016 г.

Руководитель ВКР В. Н. Тимофеев, зав. кафедрой, д.т.н, ПИ СФУ

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР МГД-перемешиватель имеет следующие технические характеристики: количество фаз $m=2$; действующее значение тока фазы $I=300\text{А}$; номинальное напряжение 400В. Максимальные размеры МГД-перемешивателя: длина 2.5м, ширина 1.5 м, высота 0.7 м.

Перечень разделов ВКР Данная работа состоит из введения, трех разделов, заключения, списка использованных источников. В первой главе проведен обзор публикаций и патентов по теме исследования. Во второй главе произведены электромагнитные расчеты одномерной и двухмерной моделей МГД-перемешивателя, определены параметры схемы замещения и характеристики МГД-перемешивателя. В третьей главе представлены результаты экспериментального исследования промышленного МГД-перемешивателя и инженерная методика их проектирования. В заключении отмечены основные результаты работы.

Руководитель ВКР

подпись

В.Н. Тимофеев

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись

А.А. Огнев

инициалы и фамилия студента

« ____ » _____ 20__ г.
Продолжение титульного листа БР по теме «Методика проектирования МГД-
перемешивателей жидких металлов»

Нормоконтролер

подпись, дата

М. В.Первухин

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. Обзор публикаций и патентов по теме исследования	9
1.1 Способы и устройства МГД-перемешивания расплавов	9
1.2 Методики проектирования электрических машин	14
1.3 Выводы по разделу	16
2. Математическое моделирование электромагнитных процессов в МГД- перемешивателе.....	17
2.1 Общие замечания и постановка задачи	17
2.2 Одномерная модель электромагнитного поля МГД-перемешивателя..	18
2.3 Схема замещения и параметры МГД-перемешивателя	27
2.4 Двухмерная электромагнитная модель МГД-перемешивателя с продольным краевым эффектом.....	31
2.5 Выводы по разделу	33
3. Экспериментальное определение параметров МГД па промышленном образце	34
3.1 Конструкция индуктора МГД-перемешивателя	34
3.2 Измерение магнитных потоков и параметры схемы замещения	36
3.3 Определение электромагнитной мощности и комплексного сопротивления обмоток индуктора	38
3.4 Инженерная методика проектирования МГД-перемешивателей	39
3.5 Выводы по разделу	46
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	47
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	48

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электротехнологические комплексы с линейными индукционными машинами нашли широкое применение в различных областях науки и техники. Наибольшее распространение получили электромагнитные насосы, дозаторы, дроссели, перемешиватели. Основными областями применения линейных индукционных машин являются атомная энергетика, металлургия, химическая промышленность, техника физического эксперимента. В данной выпускной квалификационной работе мы рассмотрим линейную индукционную машину – магнитогидродинамический (МГД) перемешиватель жидких металлов. Основным функциональным назначением МГД-перемешивателя является:

- обеспечение однородности температуры и химического состава по всему объему ванны миксера или объема печи;
- ускорение растворения твердой шихты в расплаве;
- растворение тяжелых металлических компонент расплава

По принципу действия МГД-перемешиватель представляет собой линейную индукционную машину, которая является аналогом асинхронных электрических машин. Электромеханические устройства являются основными источниками и потребителями электроэнергии. Поэтому одной из задач автоматизированного проектирования данных устройств является поиск новых вариантов конструкции, для этого необходимы инженерные методики расчета. Особенно актуально это в условиях современного рынка, когда возрастает спрос на мелкие партии и даже штучные экземпляры устройств, рассчитанных на конкретные специфические условия эксплуатации.

Линейные индукционные машины (ЛИМ) применяют в металлургии для бесконтактного силового воздействия на расплавы металлов с целью их транспортировки, управления скоростью литья металла из миксеров и печей в кристаллизаторы, перемешивания с целью гомогенизации расплавов по

химическому составу, температуре и других технических операций. Условия применения определяют большую величину зазора между индуктором и рабочим телом, что вызвано необходимостью размещения между ними теплоизоляции. Значительные рабочие зазоры между индуктором и расплавом приводят к конструктивным особенностям индукторов МГД-перемешивателя, то есть большим абсолютным величинам полюсных шагов и, как следствие, малому числу пар полюсов. Ограниченные размеры индуктора приводят к появлению пульсирующей составляющей магнитного поля и вызывают проявление ярко выраженных поперечного и продольного краевых эффектов в рабочем теле. Усиливается влияние эффекта переноса мощности между фазами на работу машины. Перечисленные факторы обуславливают особые требования, предъявляемые к разработке ЛИМ металлургического назначения и методикам их проектирования.

В связи с этим задача разработки проектирования установки является актуальной.

Целью выпускной квалификационной работы является создание инженерной методики проектирования МГД-перемешивателя жидких металлов.

Для достижения цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести обзор методик проектирования линейных индукционных машин.
2. Составить электрическую схему замещения МГД-перемешивателя.
3. Произвести расчет электромагнитного поля МГД-перемешивателя.
4. Определить параметры электрической схемы замещения.
5. На базе эксперимента с промышленной моделью перемешивателя определить его электрические параметры схемы замещения.
6. На основании анализа решения двумерных задач оценить влияние продольного краевого эффекта на характеристики МГД-перемешивателя.

7. На основе расчетных и экспериментальных данных предложить инженерную методику проектирования МГД-перемешивателя.

Объектом исследования является МГД-перемешиватель расплава в плавильных печах и миксернах.

Предметом исследования является методика проектирования МГД-перемешивателя.

1 Обзор публикаций и патентов по теме исследования

1.1 Способы и устройства МГД-перемешивания расплавов

Существуют два способа перемешивания расплавов в миксерах: канальный и бесканальный [1]. В первом случае, в стенке миксера выполняется канал. Бегущее магнитное поле одностороннего индуктора воздействует на жидкий металл в канале, благодаря чему металл приводится в движение. Но все же канальный способ не нашел широкого применения из-за зарастания канала окислами и низкой механической стойкости тонкой плиты в месте установки индуктора. Бесканальный способ лишен этих недостатков, поэтому получил наибольшее распространение. На рисунке 1.1 представлен макет миксера с комплексом бесканального МГД-перемешивания расплава. Здесь показан пример установки индуктора перемешивателя с боковой стороны миксера. Такая установка предпочтительна для оснащения существующих стационарных миксеров, когда установка индуктора под подину связана с большими работами по изменению фундамента миксера.

На рисунках 1.1 и 1.2 представлены макет миксера и индуктор МГД-перемешивателя вертикального исполнения соответственно.



Рисунок 1.1 – Миксер с установкой индуктора в боковой стенке

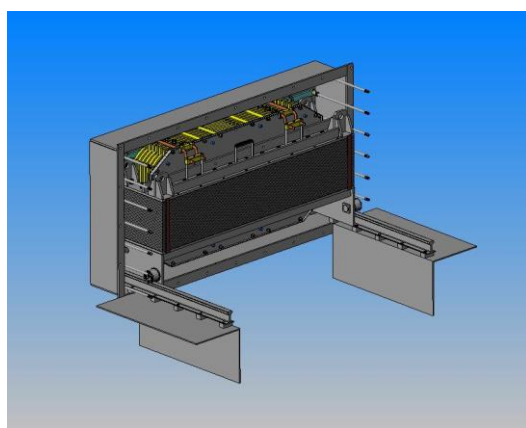


Рисунок 1.2 – Индуктор МГД-перемешивателя

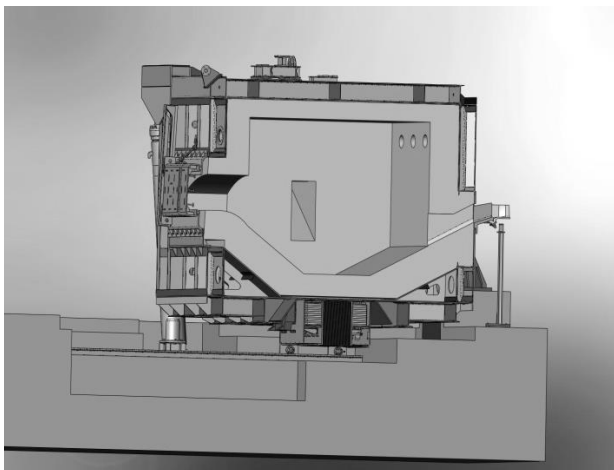


Рисунок 1.3 – Разрез поворотного миксера с установкой индуктора под подиной

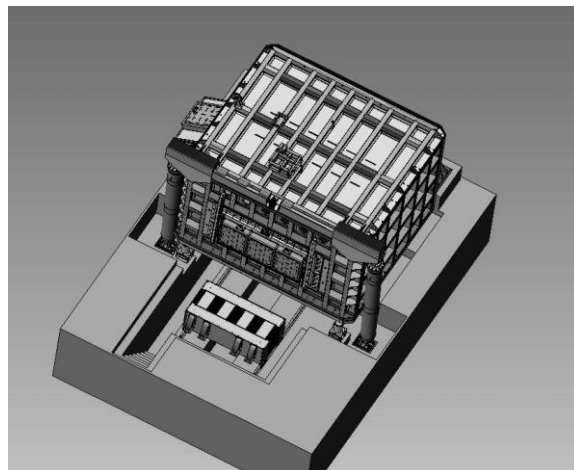


Рисунок 1.4 – Индуктор МГД-перемешивателя горизонтального исполнения

В последнее время на российских металлургических и алюминиевых предприятиях вводятся в эксплуатацию поворотные миксеры. На рисунках 1.3 и 1.4 представлен поворотный миксер, а также индуктор горизонтального исполнения. В этом случае индукторы МГД-перемешивателей удобно устанавливать под подиной миксера. Основное преимущество такого способа установки состоит в том, что перемешивание осуществляется при любом уровне расплава в ванне и максимальные скорости расплава возникают в самых нижних слоях, где сосредоточены тяжеловесные примеси.

Источником электромагнитного поля в МГД-перемешивателе является индуктор. В настоящее время используются индукторы различных конструкций с двухфазными и трехфазными обмотками, питаемыми как синусоидальными, так и несинусоидальными периодическими токами, с поперечным и продольным магнитными потоками. Так в [3] предложен электромагнитный перемешиватель жидкого металла (рисунок 1.5), содержащий магнитопровод в виде стержня с обмотками. Магнитопровод состоит из сердечника Ш-образной формы, на крайних стержнях которого расположены по две обмотки, при этом две обмотки, расположенные на разных стержнях, включены встречно, а две другие - согласовано.

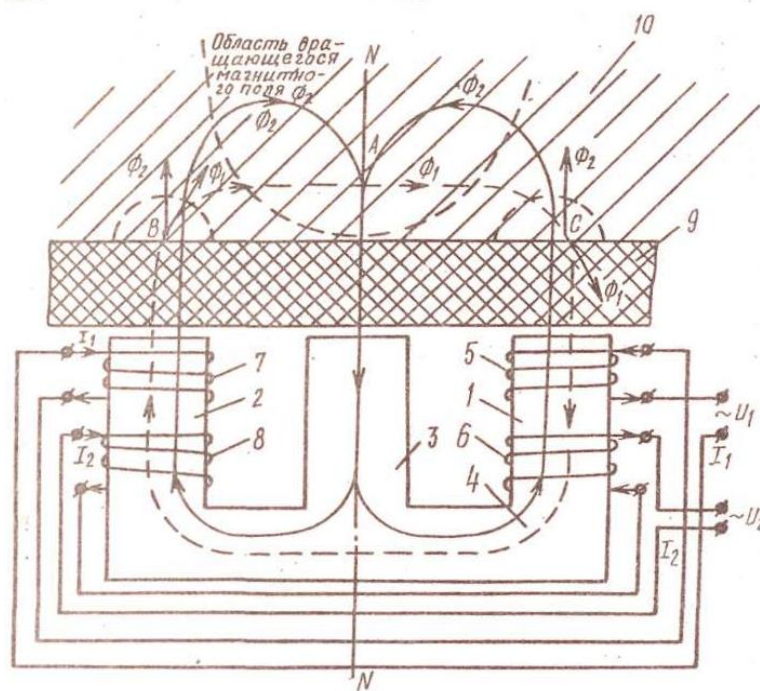


Рисунок 1.5 – Электромагнитный перемешиватель жидкого металла

С целью повышения эффективности воздушного охлаждения обмоток МГД-перемешивателя жидких металлов в [4] предложен индуктор линейной индукционной машины (рисунок 1.6), состоящий из разомкнутого магнитопровода и обмотки, фазы которой образованы одинаковыми катушками, разделенными по высоте паза на несколько секций (7) и (8).

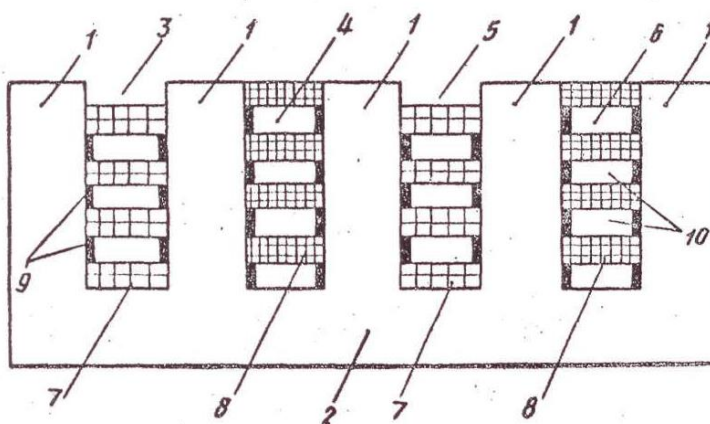


Рисунок 1.6 – Индуктор линейной индукционной машины

Такая конструкция обмотки обеспечивает образование продольных каналов для естественного охлаждения, а также позволяет уменьшить расход

обмоточных материалов за счёт исключения перекрещивания лобовых частей обмотки.

В [5] автор предлагает осуществить перемешивание электропроводных расплавов в миксерах, печах одновременным воздействием бегущего электромагнитного поля и одного или нескольких пульсирующих электромагнитных полей, расположенных в зоне бегущего поля, действующих по всей высоте столба расплава с боковой стороны миксера.

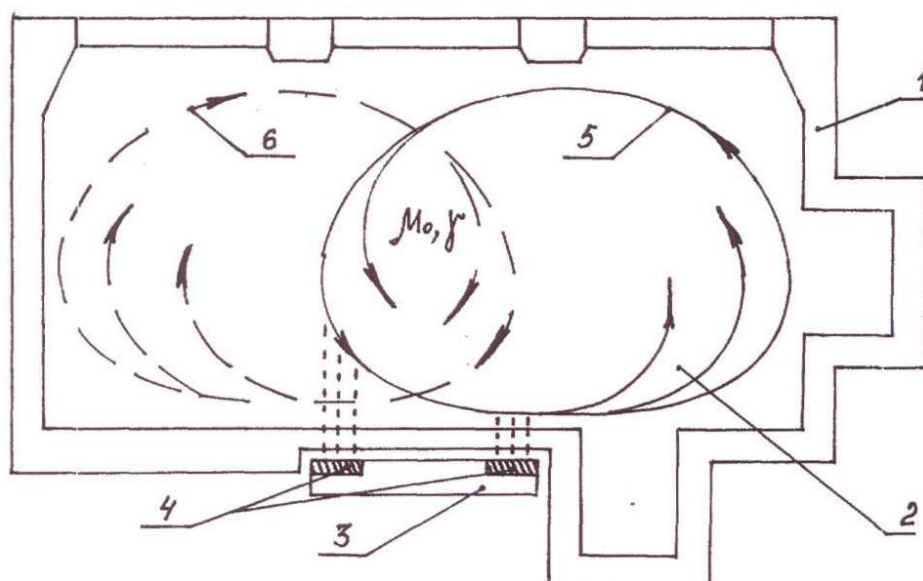


Рисунок 1.7 – Индуктор МГД-перемешивателя, установленный с боковой стороны ванны

В патенте [6] предложена печь с индуктором электромагнитного перемешивателя, содержащая магнитопровод и как минимум двухфазную обмотку, и установленная в районе ванны для приложения электромагнитного поля к находящемуся в ванне металлу. Обмотка индуктора состоит из катушек, активные проводники которых расположены относительно друг друга на расстоянии, равном $\Delta_x = l_x / (N - 1)$, где l_x – длина наибольшей стороны прямоугольной ванны, в которой находится расплав металла. N – количество катушек, определяемая как округленное до ближайшего четного числа отношение l_x / n . Изобретение позволяет в зависимости от соединения катушек,

расположенных вокруг магнитопровода, получить разную структуру конвективных потоков расплава и обеспечить эффективное перемешивание расплава металла с выравнивания его температуры и химического состава. Данное устройство представляет собой распределенный по длине ванне индуктор.

В [7] предложено устройство печи-миксера с МГД-перемешивателем, питаемое от источника несинусоидального напряжения (рисунок 1.8).

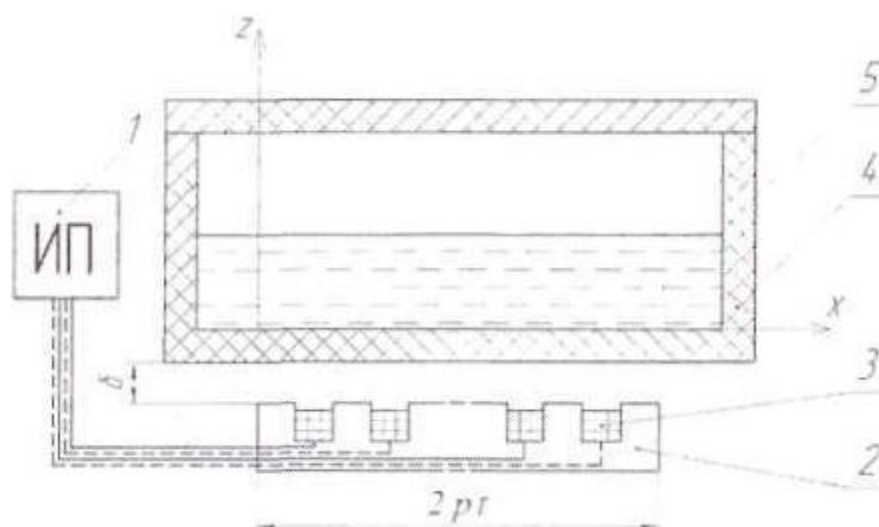


Рисунок 1.8 – Печь-миксер с МГД-перемешивателем

В качестве источника питания используют источник несинусоидального периодического напряжения, а параметры каждой фазы обмотки индуктора в индукционной установке отвечают условию:

$$L / R \leq 0.2 \cdot 10^{-7} \gamma \tau^2,$$

где L – индуктивность, Гн;

R – активное сопротивление, Ом;

γ – удельная электропроводность жидкого металла, $1/\text{Ом} \cdot \text{м}$;

τ – полюсное деление индуктора, м.

Для такой индукционной установки характерно также сокращение времени работы и энергопотребления.

1.2 Методики проектирования электрических машин

Процесс создания МГД-перемешивателя состоит из проектирования, изготовления и испытания. При проектировании необходимо изучить общие закономерности, характеризующие связь расчетных мощностей МГД-перемешивателя с основными геометрическими размерами и электромагнитными нагрузками [8].

Условно процесс проектирования можно разделить на следующие этапы:

- подготовительный;
- расчетный;
- создание рабочей конструкторской документации.

Подготовительный этап начинается с основных требований к МГД-перемешивателю, который будет проектироваться. Эти требования могут быть в виде технического задания (ТЗ) или технических требований (ТТ). В них обязательно указываются номинальные мощность, напряжение, производительность и другие эксплуатационные свойства.

Исходя из поставленных требований, а также конструкции печи миксера, где необходимо осуществить перемешивание жидких металлов, оценивается возможность их выполнения, выбор той или иной конструкции МГД-перемешивателя, активные, изоляционные и конструктивные материалы, предусмотреть технологию проектирования.

Предварительные решения подготовительного этапа должны соответствовать требованиям действующих стандартов.

Расчётный этап проектирования должен выполнить следующие требования:

- проектируемый МГД-перемешиватель должен быть надёжным в эксплуатации;
- проектируемое устройство должно обеспечивать эксплуатационные характеристики согласно требованиям;

- спроектированному МГД-перемешивателю должна быть дана экономическая оценка.

Под надёжностью понимают электрическую, тепловую и механическую прочности МГД-перемешивателя во всех режимах работы. Надёжность обеспечивается электромагнитным, механическим, вентиляционным и тепловым расчётами.

Эксплуатационные свойства МГД-перемешивателя обеспечиваются соответствующим выбором основных размеров и мощности, а также электромагнитным, тепловым и гидродинамическим расчётами.

Расчетный этап заканчивается экономической оценкой спроектированного устройства, оценкой стоимости материалов, комплектующих, затрат на производство и эксплуатацию.

Третий, завершающий этап проектирования состоит в создании рабочих чертежей на детали и сборочные узлы, конструкция и размеры которых определены на расчётном этапе. Рабочие чертежи передаются на завод или цех для изготовления и сборки готового изделия.

Описанный выше подход при проектировании в полной мере осуществляется при изготовлении МГД-перемешивателя в малых количествах на небольших частных предприятиях.

При проектировании серий или крупных партий МГД-перемешивателей государственными организациями или крупными частными фирмами осуществляется поэтапный отчёт по проделанной работе. Каждый отчёт в меньшей или большей степени содержит перечисленные выше этапы и отражает стадию разработки, то есть проектирования.

1.3 Выводы по разделу

1. МГД-перемешиватель представляет собой двух или трехфазную одностороннюю линейную индукционную машину (ЛИМ), устанавливаемую под днищем или с боковой стороны печи.

2. МГД перемешивание используется достаточно давно - с 50-х годов 20-го века и в настоящий момент широко используется в цветной и черной металлургии, благодаря многим существенным достоинствам.

3. Обзор патентов показывает, что существуют МГД-перемешиватели различных конструкций, сосредоточенных и распределенных индукторами, питаемыми от сети синусоидальными и несинусоидальными напряжениями.

4. При проектировании конкретного МГД-перемешивателя, на основании исходных данных заказчика, необходимо определить геометрические размеры устройства и его электроэнергетические характеристики.

2 Математическое моделирование электромагнитных процессов в МГД-перемешивателе

2.1 Общие замечания и постановка задачи

Вначале получим решение одномерной задачи по распределению электромагнитного поля в системе индуктор – ванна с расплавом. Затем определим параметры схемы замещения МГД-перемешивателя и его энергетические характеристики. Полученные при решении одномерной задачи выражения дифференциальных и интегральных характеристик имеют простой вид и удобный для использования методики проектирования. Проведя анализ решения двухмерной задачи определим коэффициенты, позволяющие учесть влияние продольного краевого эффекта МГД-перемешивателя и предложить простую инженерную методику.

Эскиз ванны с металлом и индуктора бегущего магнитного поля представлен на рисунке 2.1 [1].

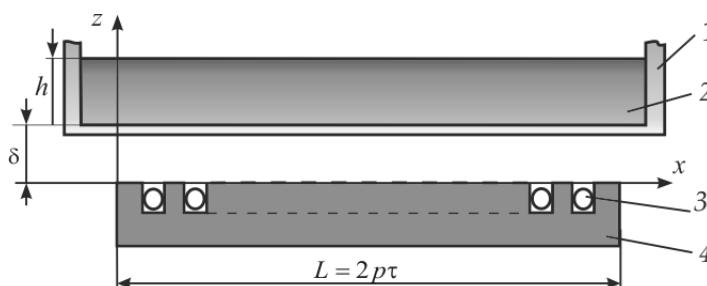


Рисунок 2.1 – Индуктор бегущего магнитного поля
вблизи ванны с металлом

Здесь 1 – прямоугольная ванна; 2 – расплав; 3 – многофазная обмотка; 4 – магнитопровод индуктора.

Индуктор расположен на расстоянии δ от расплава и имеет длину $L=2p\tau$, где p – число пар полюсов; τ – полюсное деление.

Проведем анализ электромагнитного поля, дифференциальных и интегральных характеристик такой системы при различных значениях

полюсного деления τ , величины зазора δ , частоты питающего напряжения f и линейной токовой нагрузки индуктора [А/м]

$$A = \frac{mW}{p\tau} I, \quad (1)$$

где m – число фаз; W – число витков в фазе обмотки; I – ток фазы обмотки.

Под дифференциальными характеристиками будем понимать значения векторов электромагнитного поля, плотности тока и удельных электромагнитных сил, действующих на каждый элементарный объем расплавленного металла.

Под интегральными характеристиками будем понимать электромагнитную мощность, потребляемую индуктором, тяговое усилие индуктора и отталкивающую силу индуктора от металла.

2.2 Одномерная модель электромагнитного поля МГД-перемешивателя

Рассмотрим одномерную модель системы индуктор – ванна с расплавом. На рисунке 2.2 представлена расчетная модель, при построении которой приняты следующие допущения [1].

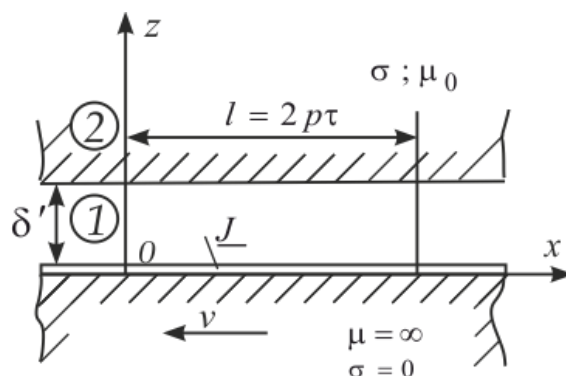


Рисунок 2.2 – Расчетная модель
МГД перемешивания

1. Воздушный зазор является равномерным, благодаря введению расчетного зазора, влияние пазов сердечника индуктора будет учитываться

$$\delta = k_{\mu} k_{\delta} \delta. \quad (2)$$

2. Бесконечно широкий и бесконечно длинный (по оси x) сердечник индуктора имеет магнитную проницаемость $\mu = \infty$ и проводимость $\sigma = 0$.

3. Примем систему координат жестко связанной с металлом, как с твердым телом, то есть все элементы металла двигаются с одинаковой скоростью v , а электромагнитные процессы в металле изменяются с угловой частотой w_0 .

4. Обмотку индуктора представим в виде бесконечно тонкого слоя тока. Линейная плотность тока будет изменяться в пространстве и во времени по закону

$$\underline{J} = A e^{i(w_0 t - \alpha x)}, \quad (3)$$

где $\alpha = \pi / \tau$; $w_0 = wS$; $w = 2\pi f$; $S = \frac{2\tau f - v}{2\tau f}$ – скольжение.

Решение будем искать через векторный магнитный потенциал в области ① $0 \leq z \leq \delta'$ и области ② $\delta' \leq z \leq \infty$.

$$\dot{\underline{A}}_1 = \overline{e}_y \dot{A}_{1y}; \dot{\underline{A}}_2 = \overline{e}_y \dot{A}_{2y}, \quad (4)$$

где \overline{e}_y – единичный вектор по оси $0, y$.

В области воздушного зазора 1 справедливо уравнение

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_{1y}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_{1y}}{\partial x^2} = 0. \quad (5)$$

В области металла 2 векторный потенциал удовлетворяет уравнению

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_{2y}}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 \dot{A}_{2y}}{\partial x^2} - \mu_0 \sigma w_0 \dot{A}_{2y} = 0, \quad (6)$$

где δ – удельная проводимость металла, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

Поскольку расчет ведется по первой пространственной гармонике, то искомые векторные потенциалы $\dot{A}_{1,2}$ имеют вид:

$$\dot{A}_{1,2}(x, z) = \dot{A}_{1,2}(z) e^{-i\alpha x}. \quad (7)$$

Подставив (7) в (5) и (6), будем иметь

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_{1y}}{\partial z^2} - \alpha^2 \dot{A}_{1y} = 0, \quad (8)$$

$$\frac{\partial^2 \dot{A}_{2y}}{\partial z^2} - \varphi^2 \dot{A}_{2y} = 0, \quad (9)$$

$$\text{где } \varphi^2 = \alpha^2 + i\mu_0 \sigma w_0. \quad (10)$$

Общие решения обыкновенных дифференциальных уравнений второго порядка имеют вид

$$\dot{A}_{1y} = c_1 e^{\alpha z} + c_2 e^{-\alpha z}; \quad (11)$$

$$\dot{A}_{2y} = c_3 e^{\varphi z} + c_4 e^{-\varphi z}; \quad (12)$$

Постоянные интегрирования $c_1 \div c_2$ определяются из граничных и краевых условий:

$$\dot{A}_{1y} \Big|_{z=\delta'} = \dot{A}_{2y} \Big|_{z=\delta'}; \quad (13)$$

$$\left. \frac{\partial \dot{A}_{1y}}{\partial z} \right|_{z=\delta'} = \left. \frac{\partial \dot{A}_{2y}}{\partial z} \right|_{z=\delta'} ; \quad (14)$$

$$\left. \frac{\partial \dot{A}_{1y}}{\partial z} \right|_{z=\delta'} = -\mu_0 J_0 ; \quad (15)$$

$$\dot{A}_{2y} \Big|_{z \rightarrow \infty} = 0. \quad (16)$$

С учетом (15), необходимо принять $c_3 = 0$.

Подставив (10) и (11) в (12)÷(14), получаем

$$\left. \begin{aligned} c_1 e^{\alpha\delta} + c_2 e^{-\alpha\delta} - c_4 e^{-\varphi\delta} &= 0 \\ \alpha c_1 e^{\alpha\delta} - \alpha c_2 e^{-\alpha\delta} + \varphi c_4 e^{-\varphi\delta} &= 0 \\ \alpha c_1 - \alpha c_2 + 0 &= -\mu_0 J \end{aligned} \right\}. \quad (17)$$

Систему алгебраических уравнений (16) решим методом определителей

$$\Delta = \begin{vmatrix} e^{\alpha\delta} & e^{-\alpha\delta} & -e^{-\varphi\delta} \\ \alpha e^{\alpha\delta} & -\alpha e^{-\alpha\delta} & \varphi e^{-\varphi\delta} \\ \alpha & -\alpha & 0 \end{vmatrix} = \alpha \left(\varphi e^{-\delta(\alpha+\varphi)} - \alpha e^{-\delta(\alpha+\varphi)} \right) + \quad (18)$$

$$+ \alpha \left(\varphi e^{\delta(\alpha-\varphi)} + \alpha e^{\delta(\alpha-\varphi)} \right) = 2\alpha e^{-\varphi\delta} (\alpha \delta \alpha + \varphi \delta \alpha);$$

$$\Delta C_1 = \begin{vmatrix} 0 & e^{\alpha\delta} & -e^{-\varphi\delta} \\ 0 & -\alpha e^{-\alpha\delta} & \varphi e^{-\varphi\delta} \\ -\mu_0 J & -\alpha & 0 \end{vmatrix} = -\mu_0 J \left(\varphi e^{\delta(\alpha-\varphi)} - \alpha e^{-\delta(\alpha+\varphi)} \right) = \quad (19)$$

$$= -\mu_0 J \varphi e^{\alpha\delta} \cdot e^{-\varphi\delta} + \mu_0 J \alpha e^{-\alpha\delta} \cdot e^{-\varphi\delta} = -\mu_0 J e^{-\varphi\delta} (\varphi e^{\alpha\delta} + \alpha e^{-\alpha\delta});$$

$$\Delta C_2 = \begin{vmatrix} e^{\alpha\delta} & 0 & -e^{-\varphi\delta} \\ \alpha e^{\alpha\delta} & 0 & \varphi e^{-\varphi\delta} \\ \alpha & -\mu_0 J & 0 \end{vmatrix} = \mu_0 J \left(\varphi e^{\delta(\alpha-\varphi)} + \alpha e^{\delta(\alpha-\varphi)} \right) =$$

$$= \mu_0 J \varphi e^{-\varphi\delta} (\varphi e^{\alpha\delta} + \alpha e^{\alpha\delta});$$

$$\dot{A}_{1y} = \frac{\Delta C_1}{\Delta} e^{\alpha z} + \frac{\Delta C_2}{\Delta} e^{-\alpha z} = -\mu_0 \frac{J}{\alpha} \left[\frac{\alpha \operatorname{ch} \alpha (z - \delta) - \varphi \operatorname{sh} \alpha (z - \delta)}{\alpha \operatorname{sh} \alpha \delta + \varphi \operatorname{ch} \alpha \delta} \right];$$

$$\Delta C_4 = \begin{vmatrix} e^{\alpha\delta} & e^{-\alpha\delta} & 0 \\ \alpha e^{\alpha\delta} & -\alpha e^{-\alpha\delta} & 0 \\ \alpha & -\alpha & -\mu_0 J \end{vmatrix} = \mu_0 J (-\alpha - \alpha) = 2\alpha\mu_0 J;$$

$$\dot{A}_{2y} = C_4 e^{-\varphi z} = \frac{\Delta C_4 e^{-\varphi z}}{\Delta} = -\mu_0 J \left[\frac{e^{\varphi(\delta-z)}}{\alpha \operatorname{sh} \alpha \delta + \varphi \operatorname{ch} \alpha \delta} \right].$$

Из определения векторного потенциала имеем

$$\bar{B}_x = -\frac{\partial \dot{A}_y}{\partial z};$$

$$\bar{B}_z = \frac{\partial \dot{A}_y}{\partial x};$$

$$\bar{E}_y = -i\omega_0 \dot{A}_y.$$

Электромагнитные мощность и силы. Найдем полную электромагнитную мощность, передаваемую обмоткой индуктора в зазор

$$\underline{S}^{EM} = -\int_0^a \int_0^L (E_{1y} \big|_{z=0} \underline{J}) dx dy = P^{EM} + jQ^{EM} = \omega_0 \mu_0 \frac{J^2 a L}{a} [X + jY].$$

Здесь

$$X + iY = i \frac{ch\alpha\delta + \underline{\varepsilon}sh\alpha\delta}{sh\alpha\delta + \underline{\varepsilon}ch\alpha\delta}, \quad (28)$$

где $\underline{\varepsilon} = \sqrt{1 + i\varepsilon}$;

$$\varepsilon = \frac{\mu_0 \sigma w_0 \tau^2}{\pi^2} - \text{коэффициент добротности.} \quad (29)$$

Электромагнитная сила, действующая на индуктор в направлении движения, определяется выражением

$$F^{EM} = \operatorname{Re} \left\{ B_{1z} \Big|_{z=0} \dot{\underline{J}} \right\} \alpha L = \mu_0 J^2 \alpha L X. \quad (30)$$

Электромагнитная сила отталкивания индуктора от металла равна

$$F_z = -\frac{\mu_0}{2} \left[J^2 - \left| \frac{B_{1z}|_{z=0}}{\mu_0} \right|^2 \right] \alpha L = \frac{1}{2} \mu_0 J^2 \left[(X^2 + Y^2) \right] \alpha L. \quad (31)$$

Примем за базисную мощность величину, ВА

$$P_b = \frac{w_0 \mu_0 \alpha 2 \rho \tau}{\alpha} J^2. \quad (32)$$

и определим выражения для относительных активной и реактивной мощностей

$$\hat{P}^{EM} = \frac{P^{EM}}{P_b} = X; \quad (33)$$

$$\hat{Q}^{EM} = \frac{Q^{EM}}{P_b} = Y. \quad (34)$$

За базисную силу можно принять величину, Н

$$F_b = \frac{P_b}{2\tau f} = \mu_0 \alpha 2\pi \tau J^2. \quad (35)$$

В соответствии с (28) и (29) относительные электромагнитные силы определяются следующими выражениями

$$\hat{F}^{EM} = F^{EM} / P_b = X; \quad (36)$$

$$\hat{F}_Z^{EM} = \frac{\hat{F}_Z^{EM}}{P_b} = 0,5 \left[1 - (X^2 + Y^2) \right]. \quad (37)$$

Коэффициент мощности индукционной машины равен

$$\cos \varphi = \frac{\hat{P}^{EM}}{\sqrt{(\hat{P}^{EM})^2 + (\hat{Q}^{EM})^2}} = \frac{X}{\sqrt{X^2 + Y^2}}. \quad (38)$$

Электромагнитный коэффициент полезного действия машины в двигательном режиме равен

$$\eta^{EM} = \frac{(1-S)\hat{F}^{EM}}{\hat{P}^{EM}} = 1 - s. \quad (39)$$

Как следует из полученных выражений, все безразмерные характеристики определяются тремя параметрами:

$$\varepsilon = \frac{\mu_0 \sigma w_0 \tau^2}{\pi^2} - \text{коэффициент добротности};$$

s – скольжение ($w_0 = ws$);

δ / τ – относительная величина зазора между индуктором и металлом.

Таким образом, для определения интегральных и дифференциальных электромагнитных характеристик МГД-перемешивателя, можно использовать выражение, полученное при решении одномерной задачи. Если задаться

конкретной величиной скольжения (рабочее скольжение), то все характеристики определяются добротностью ε и относительной величиной зазора между индуктором и металлом δ / τ .

Для примера на рисунке 2.3,а,б представлены зависимости относительных активной и реактивной мощностей от коэффициента добротности при различных значениях $\delta / \tau (s=1)$.

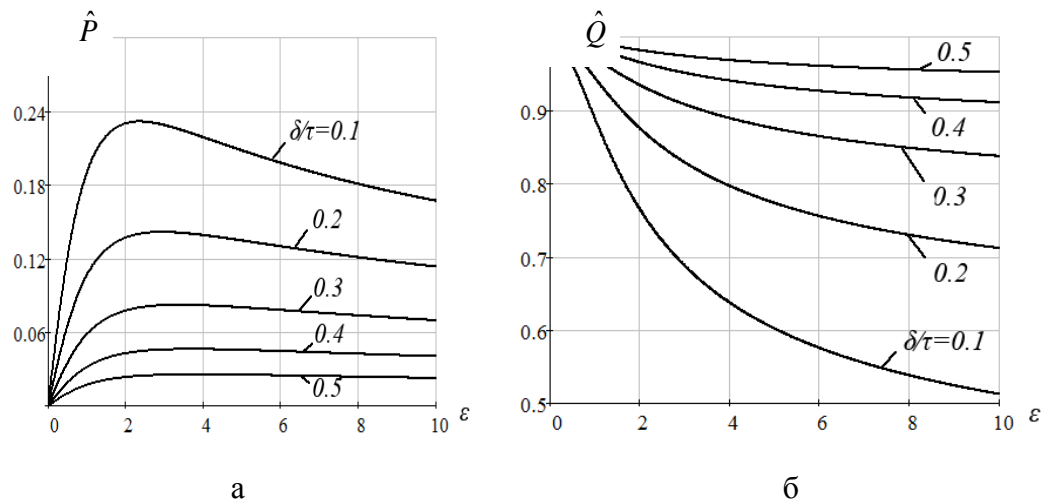


Рисунок 2.3 – Зависимости относительных активной и реактивной мощностей от коэффициента добротности

Зависимости относительных составляющих электромагнитной силы от коэффициента добротности при различных значениях $\delta / \tau (s=1)$ представлены на рисунке 2.4,а,б.

На рисунке 2.5,а,б показаны зависимости этих же сил от скольжения при различных значениях коэффициента добротности $\varepsilon (\delta / \tau = 0,3)$.

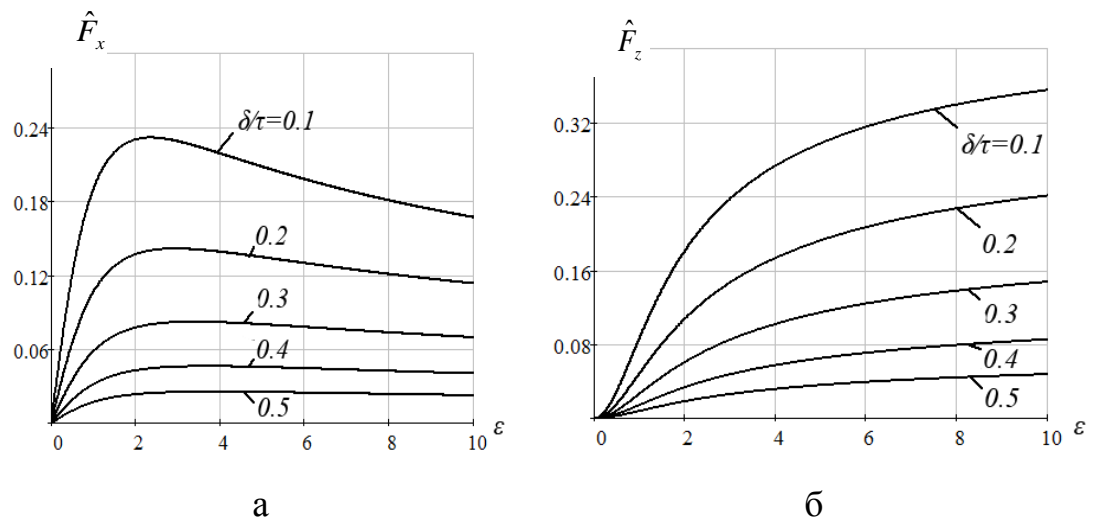


Рисунок 2.4 – Зависимости относительных составляющих
электромагнитной силы от коэффициента добротности

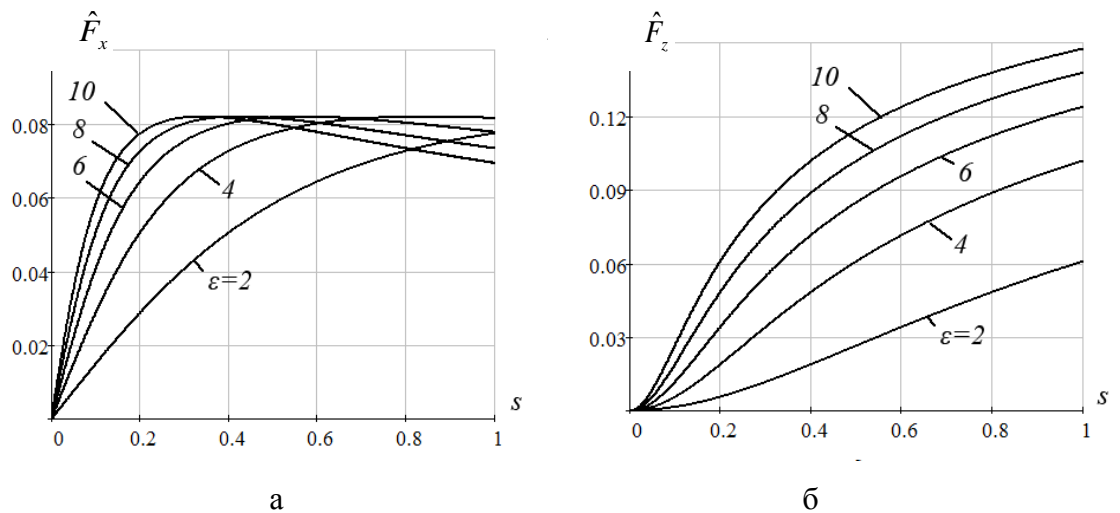


Рисунок 2.5 – Зависимости относительных составляющих
электромагнитной силы от скольжения

Зависимости коэффициента мощности $\cos \varphi$ и коэффициента полезного действия η от скольжения s при различных значениях коэффициента добротности ε ($\delta / \tau = 0,3$) представлены на рисунке 2.6, а, б.

Представленные аналитические зависимости электромагнитных характеристик МГД-перемешивателя были получены при определенных допущениях, но всё же их можно использовать на ранней стадии выбора основных параметров индуктора, а также его режимов работы. Обычно

известны электромагнитные свойства расплава, а величина зазора δ между индуктором и расплавом определяется толщиной футеровки подины миксера. Задаваясь величиной полюсного деления индуктора τ , можно определить величину коэффициента добротности ε , при котором электромагнитные характеристики имеют оптимальные значения. С помощью коэффициента добротности можно определить частоту тока индуктора

$$w = \frac{\varepsilon \pi^2}{\sigma \mu_0 \tau^2}. \quad (40)$$

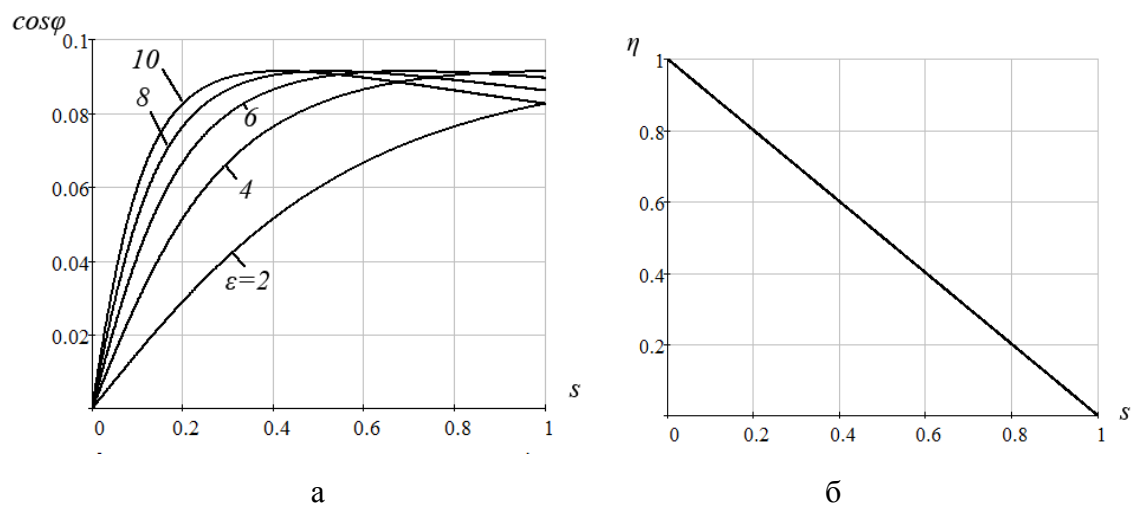


Рисунок 2.6 – Зависимости коэффициента мощности и коэффициента полезного действия от скольжения

По относительным значениям мощностей и сил, используя базовые значения мощности P_b и силы F_b можно оценить абсолютные значения электромагнитных мощностей и силы.

2.3 Схема замещения и параметры МГД-перемешивателя

В теории электрических машин широко пользуются схемами замещения, которые позволяют легко и наглядно устанавливать связи между различными электромагнитными величинами и исследовать режимы электрических машин. Подобные же схемы замещения можно использовать и для индукционных

МГД-машин. Рассмотрим, прежде всего, последовательную схему замещения [1].

На рисунке 2.7 представлена последовательная схема замещения МГД – перемешивателя.

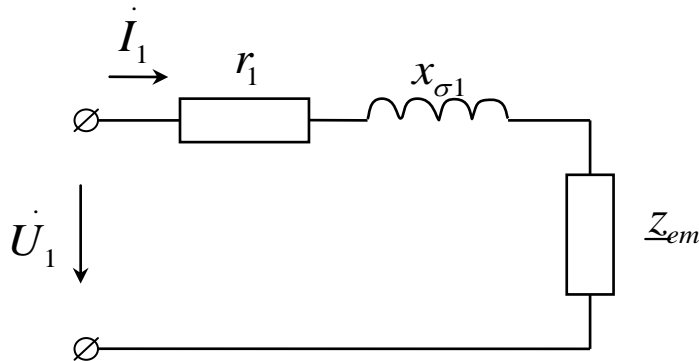


Рисунок 2.7 – Схема замещения фазы обмотки МГД-перемешивателя

В схеме замещения r_1 – активное сопротивление обмотки индуктора;

Величину $x_{\sigma 1}$ можно представить в виде следующих слагаемых:

$$x_{\sigma 1} = x_{\pi} + x_{\lambda} + x_{\delta}, \quad (41)$$

где x_{π} – сопротивление пазового рассеяния; x_{λ} – сопротивление лобового рассеяния; x_{δ} – сопротивление дифференциального рассеяния. $r_{\text{ЭМ}}$ и $x_{\text{ЭМ}}$ соответственно активное и реактивное сопротивления последовательной схемы замещения, соответствующее активной и реактивной электромагнитным мощностям, передаваемым от индуктора в зазор между индуктором и расплавом.

Пазовое рассеяние. Для паза прямоугольной формы (рисунок 2.8) индуктивное сопротивление пазового рассеяния можно определить по формуле [9]:

$$x_{\pi} = x_{\pi 1} \cdot \lambda_{\pi}. \quad (42)$$

Здесь главное индуктивное сопротивление фазы обмотки индуктора:

$$x_{r1} = 4f \cdot 2\alpha\mu_0 \frac{mW_1^2}{p}. \quad (43)$$

Индуктивное сопротивление пазового рассеяния:

$$x_n = 4f \cdot 2\alpha\mu_0 \frac{mW_2^2}{p}. \quad (44)$$

Относительная магнитная проводимость рассеяния паза:

$$\lambda_n = \frac{h_1}{3b_n} + \frac{h_2}{b_n}. \quad (45)$$

Данная безразмерная величина определяет потокосцепление рассеяния паза на единицу длины машины. Из этого выражения следует, что пазовое рассеяния тем больше, чем выше и уже пазы.

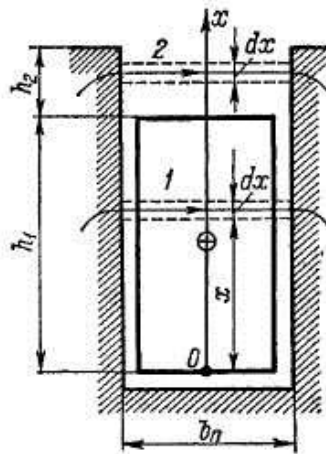


Рисунок 2.8 – Поле рассеяния паза

Лобовое рассеяние. Для МГД-машины с двухсторонним сердечником в [10] сопротивление лобового рассеяния рекомендовано определять по формуле:

$$x_n = x_{r1} \cdot \lambda_n, \quad (46)$$

$$\text{где } \lambda_{\text{л}} = 0.34 \frac{q}{l' \delta} (1_{\text{л}} - 0.64 \beta \tau) k^2 y. \quad (47)$$

Формула для индуктивного сопротивления рассеяния лобовых частей:

$$x_{\text{л}} = 4f \cdot 2\alpha \mu_0 \frac{mW_2}{p}. \quad (48)$$

МГД-перемешиватель представляет собой индукционную машину с односторонним индуктором и формула для определения $x_{\text{л}}$ должна корректироваться.

Дифференциальное рассеяние. Индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния обмотки $x_{\text{д}}$ равно сумме сопротивлений самоиндукции всех гармоник, за исключением гармоники $V=1$. Поэтому:

$$x_{\text{д}} = \frac{4mf}{\pi} \cdot \frac{\mu_0 l_{\delta} \tau}{k_{\mu} k_{\delta} \delta} \cdot \frac{w^2}{p} \sum_{v \neq 1} \frac{k^2 o \delta v}{V^2}. \quad (49)$$

Отношение $x_{\text{д}}$ к главному индуктивному сопротивлению обмотки называется коэффициентом дифференциального рассеяния $k_{\text{д}}$.

$$k_{\text{д}} = \frac{1}{k^2 o \delta_1} \sum_{v \neq 1} \frac{k^2 o \delta v}{V^2}. \quad (50)$$

Комплексное сопротивление $\underline{Z}_{\text{ЭМ}} = r_{\text{ЭМ}} + jx_{\text{ЭМ}}$ связано с комплексной электромагнитной мощностью, передаваемой с поверхности индуктора $\underline{S}_{\text{ЭМ}}$, то есть:

$$\underline{Z}_{\text{ЭМ}} = \frac{\underline{S}_{\text{ЭМ}}}{mI^2}. \quad (51)$$

Величину $\underline{Z}_{\text{ЭМ}}$ можно представить в виде [11]:

$$\underline{Z}_{\Sigma M} = \underline{Z}_{\Sigma M 0} + \underline{Z}_{\text{к.э.}}, \quad (52)$$

где $\underline{Z}_{\Sigma M 0}$ определяется нормальным бегущим магнитным полем, эта величина определена в разделе 2.2.

Величина $\underline{Z}_{\text{к.э.}}$ определяется краевым эффектом в МГД-перемешивателе. Таким эффектом является продольный краевой эффект, который обусловлен конечной длиной индуктора.

2.4 Двухмерная электромагнитная модель МГД-перемешивателя с продольным краевым эффектом

В [11] проведен анализ электромагнитных процессов в МГД-перемешивателе в двухмерной постановке с использованием расчетной модели, которое учитывает дискретное распределение обмотки и конечную длину индуктора. Конечная длина индуктора, а именно наличие входа поля и выхода из него, является причиной проявления продольного краевого эффекта.

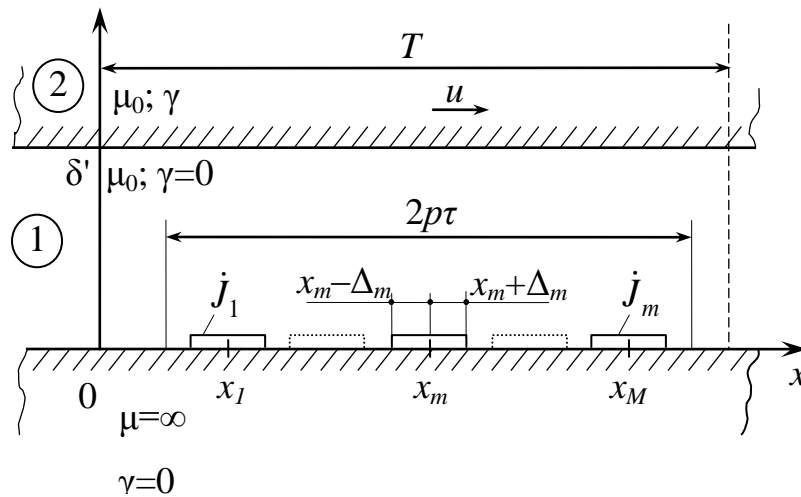


Рисунок 2.9 – Расчетная модель МГД-перемешивателя

На рисунке 2.9 представлена расчетная модель МГД-перемешивателя, где $x_1 \dots x_m \dots x_M$ – координаты середины m -го паза; M – количество пазов; T – период; p – число пар полюсов; τ – полюсное деление

В результате анализа электромагнитного поля, получены аналитические выражения для электромагнитной мощности и силы

$$\hat{\underline{S}}_{EM} = \frac{\underline{S}_{EM}}{P_b} = i \frac{\hat{T}^2}{4\pi} \sum_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^3} \cdot \frac{\hat{G}_n(0)}{\hat{Q}_n} \hat{C}_{n1} \hat{C}_{n2}; \quad (53)$$

$$\hat{\underline{F}}_{EM} = \frac{\underline{F}_{EM}}{F_b} = \text{Re} \left\{ \frac{\hat{T}^2}{2\pi} \sum_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n^2} \cdot \frac{\hat{G}_n(0)}{\hat{Q}_n} \hat{C}_{n1} \hat{C}_{n2} \right\}, \quad (54)$$

$$\text{где } \hat{G}_n(\hat{z}) = \hat{k}_n \text{ch} \hat{k}_n (\hat{z} - \hat{\delta}') - \hat{\phi}_n \text{sh} \hat{k}_n (\hat{z} - \hat{\delta}'); \quad (55)$$

$$\hat{Q}_n = \hat{k}_n \text{sh} \hat{k}_n \hat{\delta} + \hat{\phi}_n \text{ch} \hat{k}_n \hat{\delta}'; \quad (56)$$

$$\hat{k}_n = \frac{\tau}{\pi} k_n = \frac{2n}{T}; \quad (57)$$

$$\hat{C}_{n1} = \sum_{m=1}^M \hat{J}_m \sin \hat{k}_n \hat{\Delta}_m e^{-i\hat{k}_n \hat{x}_m}; \quad (58)$$

$$\hat{C}_{n2} = \sum_{m=1}^M \hat{J}_m \sin \hat{k}_n \hat{\Delta}_m e^{-i\hat{k}_n \hat{x}_m}. \quad (59)$$

Зная величину электромагнитной мощности можно определить параметры схемы замещения:

$$\underline{Z}_{\mathcal{EM}} = \frac{\underline{S}_{\mathcal{EM}}}{mI^2}; \quad (60)$$

$$\hat{\underline{Z}}_{\mathcal{EM}} = \frac{\underline{Z}_{\mathcal{EM}}}{X_r}; \quad (61)$$

$$\hat{r}_{\mathcal{EM}} = \text{Re} \{ \hat{\underline{Z}}_{\mathcal{EM}} \}; \quad (62)$$

$$\hat{x}_{\mathcal{EM}} = \text{Im} \{ \hat{\underline{Z}}_{\mathcal{EM}} \}; \quad (63)$$

$$\hat{\underline{Z}}_{\text{ЭМ}} = \hat{r}_{\text{ЭМ}} + i\hat{x}_{\text{ЭМ}}. \quad (64)$$

Относительное активное $\hat{r}_{\text{ЭМ}}$ и реактивное $\hat{x}_{\text{ЭМ}}$ сопротивления учитывают продольный краевой эффект и дискретное распределение обмотки.

При решении одномерной задачи также получены выражения для относительного электромагнитного сопротивления в виде

$$\hat{r}_{\text{ЭМ}} = X \cdot k_r; \quad (65)$$

$$\hat{x}_{\text{ЭМ}} = Y \cdot k_x. \quad (66)$$

Отсюда

$k_r = \frac{\hat{r}_{\text{ЭМ}}}{X}; k_x = \frac{\hat{x}_{\text{ЭМ}}}{Y}$ – коэффициенты, учитывающие влияние продольного краевого эффекта на активное и реактивное сопротивление.

2.5 Выводы по разделу

1. В результате решения одномерной задачи получены параметры схемы замещения МГД-перемешивателя, которые определяются, в основном, двумя величинами: коэффициентом добротности ε и относительным зазором δ / τ .
2. В результате решения двумерной задачи получены параметры схемы замещения, которые определяются большим количеством параметров и учитывают наличие продольного краевого эффекта и дискретное распределение токовой нагрузки.
3. На основании полученных решений одномерной и двумерной задач получены коэффициенты, позволяющие учесть влияние продольного краевого эффекта и дискретного распределения нагрузки на характеристики МГД-перемешивателя.

3 Экспериментальное определение параметров МГД-перемешивателя на промышленном образце

3.2 Измерение магнитных потоков и параметры схемы замещения

С целью определения параметров схемы замещения на промышленном индукторе определялось распределение магнитной индукции и магнитные потоки. Для измерения магнитных потоков были изготовлены измерительные катушки, а величина магнитной индукции измерялась с помощью датчиков Холла. На рисунке 3.4 показано расположение измерительных катушек на поверхности индуктора.

Каждая измерительная катушка изготовлена из мощной изолированной проволоки с числом витков $W_{из.к} = 10$. Измерительные катушки показаны пунктирными линиями: 1 – измерительная катушка главного магнитного потока; 2 – измерительная катушка магнитного потока лобового рассеяния; 3 – измерительная катушка магнитного потока пазового рассеяния.

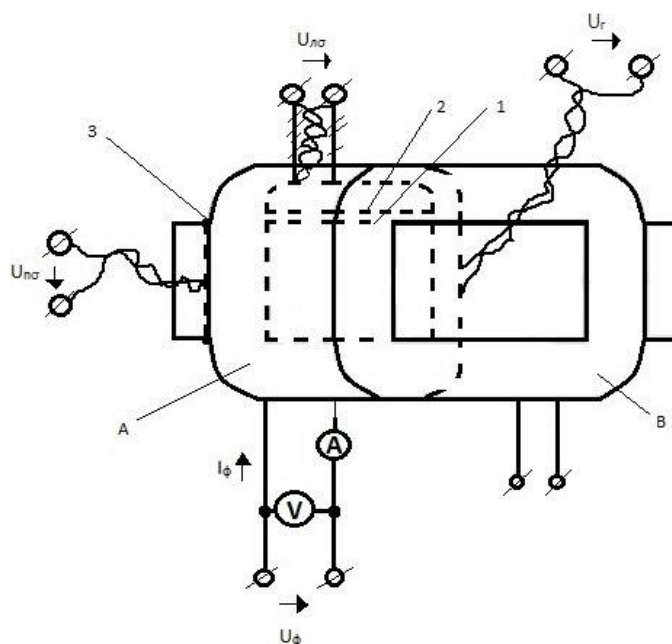


Рисунок 3.4 – Расположение измерительных катушек на поверхности индуктора

Экспериментальное исследование проводилось следующим образом. На фазу А подавалось регулируемое напряжение U_{ϕ} , частотой $f=50$ Гц. Величина тока в фазе измерялась амперметром. Главный магнитный поток наводили в катушке 1 э.д.с. равную напряжению U_{Γ} . Магнитный поток лобового рассеяния наводит в катушке 2 э.д.с. равную напряжению $U_{л\sigma}$ и магнитный поток пазового рассеяния наводит в катушке 3 э.д.с. равную напряжению $U_{п\sigma}$. Результаты измерения при напряжениях на $U_{cp}=150, 200, 237$ В приведены в таблице 3.1.

Таблица 3.1. Результаты измерений

п/п	U_{ϕ}	I_{ϕ}	U_{Γ}	$U_{п\sigma}$	$U_{л\sigma}$
Ед. из.	В	А	В	мВ	мВ
1	150	3,7	6,6	1600	400
2	200	5	9,1	2000	605
3	237	6	10,4	2300	630

Из анализа результатов измерения следует, что магнитный поток пазового рассеяния составляет 22%, а лобового рассеяния 7% от главного магнитного потока. Такая же пропорция сохранится и для индуктивных сопротивлений пазового и лобового рассеяния.

3.3 Определение электромагнитной мощности и комплексного сопротивления обмоток индуктора

Источником питания индуктора является двухфазный полупроводниковый преобразователь частоты. Рабочая частота питающего напряжения находится в интервале 0,4 – 1 Гц. Это связано с глубиной проникновения электромагнитного поля в расплав. Высота расплава в

промышленных печах – миксерах находится в диапазоне 0,6 – 1,1 м. При частоте $f=0,5$ Гц, глубина проникновения составляет 0,45 м.

Для определения электромагнитной мощности и комплексного сопротивления индуктор подключался к промышленному двухфазному преобразователю частоты. При эксперименте частота источника изменялась в пределах 0,4 – 5 Гц. Результаты измерения напряжения U , тока I , угла сдвига фаз между током и напряжением φ приведены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Экспериментальные данные

f , Гц	0,439	0,448	0,607	0,925	1,530	2,360	3,030	5,100
U , В	1,140	1,920	2,560	3,660	6,200	7,760	10,100	11,000
I , А	1,230	1,980	1,980	1,940	1,960	1,600	1,640	1,160
φ	64,000	64,000	76,000	73,600	83,000	85,700	87,300	83,000

Таблица 3.3 – Расчётные данные

Z , Ом	0,930	0,970	1,290	1,890	3,160	4,850	6,160	9,480
$\sin \varphi$	0,898	0,898	0,970	0,960	0,990	0,997	0,998	0,999
$\cos \varphi$	0,440	0,440	0,243	0,280	0,141	0,077	0,063	0,045
r	0,409	0,427	0,314	0,529	0,446	0,375	0,389	0,424
$2\pi f$	2,757	2,813	3,812	5,809	9,608	14,821	19,028	32,028
X_L , Ом	0,835	0,871	1,251	1,814	3,128	4,835	6,148	9,471
L , Гн	0,303	0,310	0,328	0,312	0,326	0,326	0,323	0,296

На основании экспериментальных данных определялись расчетные величины, которые приведены в таблице 3.3.

Полное сопротивление обмотки $Z=U/I$, Ом.

Активное сопротивление обмотки $R=Z \cdot \cos \varphi$, Ом.

Индуктивное сопротивление обмотки $X=Z \cdot \sin \varphi$, Ом.

Индуктивность фазы обмотки $L=X/2 \pi f$, Гн

Сравнение результатов эксперимента с расчетными данными позволяют определить достоверность методики проектирования индукторов МГД-перемешивателей.

3.4 Инженерная методика проектирования МГД-перемешивателя

При проектировании МГД-перемешивателя необходимо решить две задачи. Первая задача связана с выбором геометрии индуктора, величиной и характером распределения токовой нагрузки, частоты токов, режимов работы, которые обеспечат требуемое перемешивание расплавов в заданном объеме ванны.

Вторая задача связана с выбором источника питания, количества фаз, величин напряжения и токов, их частоты. Для решения второй задачи необходимо определить полные сопротивления фаз обмоток индуктора или параметры их схем замещения.

Эффективность МГД-перемешивания зависит от глубины проникновения электромагнитного поля в расплав и высоты расплава в ванне печи миксера. Высота расплава зависит от емкости ванны и, обычно, выбирается в диапазоне 0.6-1.1 м. Синусоидальное электромагнитное поле по мере распространения в расплав (ось z) затухает по экспоненциальному закону. Так согласно (4) векторный магнитный потенциал в расплаве описывается выражением:

$$\dot{A} = A_0 \cdot e^{-yz}, \quad (67)$$

где A_0 – величина векторного потенциала на поверхности расплава ($z=\delta$).

Комплексное значение $\underline{\varphi}$, согласно (10), равно

$$\underline{\varphi} = \sqrt{\frac{\pi^2}{\tau^2} + i\omega\mu_0\gamma}, \quad (68)$$

где τ - полюсное деление индуктора, м; $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с; f – частота тока, 1/с; $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ – магнитная постоянная, Гн/м; γ – удельная электропроводность расплава, 1/Ом·м.

Расстояние, на котором электромагнитное поле уменьшается в $s \approx 2,72$ раз, называется глубиной проникновения электромагнитного поля. В соответствии с (23) глубина проникновения электромагнитного поля Δ обратно пропорциональна φ и, при неизменных свойствах расплава, зависит от частоты тока f и полюсного деления τ . При $\tau \rightarrow \infty$, глубина проникновения электромагнитного поля равна глубине проникновения плоской электромагнитной ванны и при неизменных свойствах расплава полностью зависит от частоты тока f .

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_0\gamma}}. \quad (69)$$

В реальных индукторах величина полюсного деления τ имеет ограниченное значение и обычно выбирается из условия $\tau \approx (3-5)\delta$, где δ – величина расстояния от магнитопровода индуктора до расплавленного металла. Чем меньше τ , тем быстрее затухает электромагнитное поле в расплаве. С увеличением τ растут размеры индуктора и увеличивается его стоимость.

Как следует из решения одномерной задачи анализа электромагнитного поля, зависимости относительной электромагнитной силы от δ/τ коэффициента ε имеют вид:

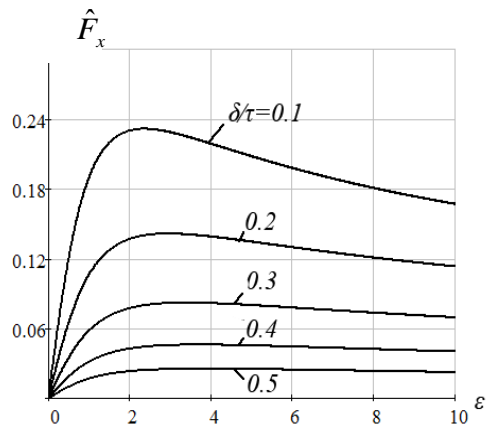


Рисунок 3.5 – Зависимость относительной электромагнитной силы от коэффициента добротности

При известном значении δ / τ можно определить значение коэффициента добротности $\varepsilon = \varepsilon_m$, при котором относительная электромагнитная сила будет иметь максимальное $\hat{F}_{\text{ЭМ}} = \hat{F}_{\text{ЭМ max}}$. Здесь $\hat{F}_{\text{ЭМ}} = F_{\text{ЭМ}} / F_0$, где за базисную силу принята

$$F_0 = \mu_0 2\pi a J^2, \quad (70)$$

где $2\pi r$ – длина индуктора, м; a – ширина индуктора, м; J – линейная токовая нагрузка, А/м.

Из представленных зависимостей следует, что при всех значениях δ / τ , значение $\varepsilon_m = 2-3$. Зная ε_m , в соответствии с (29) можно определить оптимальную частоту

$$f = \frac{\varepsilon_m \cdot \pi}{2\mu_0 \gamma \tau^2}. \quad (71)$$

При известной длине индуктора $L = 2\pi(r=1)$ выбирается тип обмотки, количества фаз m и количество пазов M .

Задается величина линейной токовой нагрузки. При воздушном охлаждении ее можно принять равной $(1,5 - 3) \cdot 10^5$ А/м. При одинаковом числе проводников в пазу и одинаковых токах в них:

$$J = \frac{M \cdot W}{2\tau} I = \frac{mW}{\tau} I, \quad (72)$$

где M – число пазов; m – число фаз.

Из (73) можно определить число витков в пазу W и сечение проводника обмотки $S_{пр}$:

$$W = \frac{J \cdot 2\tau}{MI} = \frac{J\tau}{mI}; \quad (73)$$

$$S_{пр} = \frac{I}{\Delta}, \quad (74)$$

где плотность тока при воздушном охлаждении можно принять $\Delta = 4-5$ А/мм². Зная δ / τ и ε определяются характеристики МГД – перемешивателя

$$X + iY = i \frac{ch\alpha\delta + \underline{\varepsilon}sha\delta}{sha\delta + \underline{\varepsilon}cha\delta}, \quad (75)$$

где $\underline{\varepsilon} = \sqrt{1 + i\varepsilon}$; $\alpha = \pi / \tau$. (76)

Здесь относительные активные мощность и сопротивления равны

$$\hat{P}_{ЭМ0} = \hat{r}_{ЭМ0} = \hat{r}_{F0} = X, \quad (77)$$

а относительные реактивные мощность и сопротивление равны

$$\hat{Q}_{ЭМ0} = \hat{x}_{ЭМ0} = Y. \quad (78)$$

Базовая мощность

$$P_r = F_0 \cdot 2\pi f = \frac{\omega_0 \mu_0 a 2p\tau}{\alpha} A^2. \quad (79)$$

Базовое сопротивление – главное индуктивное сопротивление обмотки

$$x_{r1} = 4f \cdot 2\alpha \mu_0 \frac{mW^2}{p}. \quad (80)$$

Из решения двухмерной задачи, продольного краевого эффекта и дискретного распределения обмотки на активную и реактивную мощности, а также на электромагнитную силу, то есть $k_r; k_x; k_f$ – соответственно.

Определим параметры схемы замещения.

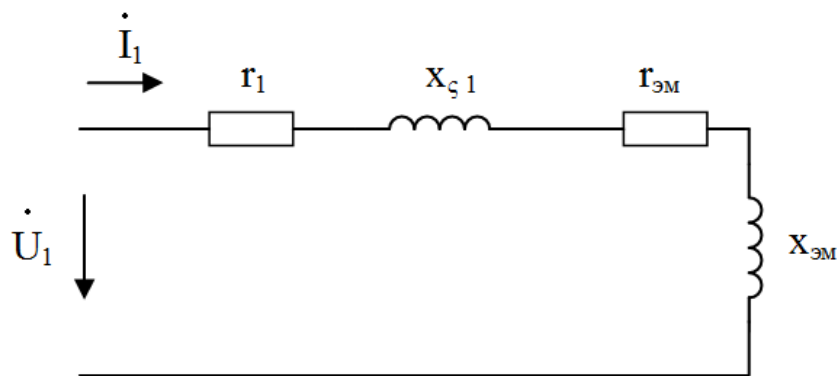


Рисунок 3.6 – Схема замещения фазы обмотки МГД-перемешивателя

В схеме замещения r_1 – активное сопротивление обмотки индуктора. Величину x_{c1} можно представить в виде следующих слагаемых:

$$x_{c1} = x_n + x_l + x_d, \quad (81)$$

где x_n – сопротивление пазового рассеяния; x_l – сопротивление лобового рассеяния; x_d – сопротивление дифференциального рассеяния. r_{EM} и x_{EM} соответственно активное и реактивное сопротивления последовательной схемы замещения, соответствующее активной и реактивной электромагнитным

мощностям, передаваемым от индуктора в зазор между индуктором и расплавом.

Индуктивное сопротивление пазового рассеяния:

$$x_{\text{п}} = 4f \cdot 2\alpha\mu_0 \frac{mW_2}{p} \cdot \left(\frac{h_1}{3b_n} + \frac{h_2}{b_n} \right). \quad (82)$$

Формула для индуктивного сопротивления рассеяния лобовых частей:

$$x_{\text{л}} = 4f \cdot 2\alpha\mu_0 \frac{mW_2}{p} \cdot \left(0.34 \frac{q}{l'\delta} (1_{\text{л}} - 0.64\beta\tau) k^2 y \right). \quad (83)$$

Индуктивное сопротивление дифференциального рассеяния:

$$x_{\text{д}} = \frac{4mf}{\pi} \cdot \frac{\mu_0 l_{\delta} \tau}{k_{\mu} k_{\delta} \delta} \cdot \frac{w^2}{p} \sum_{v \neq 1} \frac{k^2 o \delta v}{V^2}. \quad (84)$$

Относительное активное $\hat{r}_{\text{ЭМ}}$ и реактивное $\hat{x}_{\text{ЭМ}}$ сопротивления учитывают продольный краевой эффект и дискретное распределение обмотки.

$$\hat{x}_{\text{ЭМ}} = \hat{x}_{\text{ЭМ0}} \cdot k_x; \quad (85)$$

$$\hat{r}_{\text{ЭМ}} = \hat{r}_{\text{ЭМ0}} \cdot k_r; \quad (86)$$

$$\hat{r}_{\text{F}} = \hat{r}_{\text{F0}} \cdot k_f. \quad (87)$$

Отсюда $k_x = \frac{\hat{x}_{\text{ЭМ}}}{\hat{x}_{\text{ЭМ0}}}; k_r = \frac{\hat{r}_{\text{ЭМ}}}{\hat{r}_{\text{ЭМ0}}}; k_f = \frac{\hat{r}_{\text{f}}}{\hat{r}_{\text{f0}}}$ – коэффициенты, учитывающие

влияние продольного краевого эффекта на активное и реактивное сопротивление, а также мощность МГД-перемешивателя соответственно.

Энергетические характеристики МГД-перемешивателя.

При заданном напряжении по схеме замещения определяется комплексный ток в фазе обмотки, находятся активная P , реактивная Q и полная S мощности.

Механическая мощность установки

$$P_{\text{мх}} = 2\tau f(1-s)F_{\text{эм}}. \quad (88)$$

Комплексная мощность индуктора

$$\underline{S} = P + iQ. \quad (89)$$

Коэффициент мощности установки

$$\cos \varphi = \frac{P}{S}. \quad (90)$$

Коэффициент полезного действия

$$\eta = \frac{P_{\text{мх}}}{P}. \quad (91)$$

3.5 Выводы по разделу

1. При питании индуктора от преобразователя частоты определены зависимости полного, активного и реактивного сопротивления от частоты питающего напряжения.

2. Изготовлены измерительные катушки для экспериментального определения магнитных потоков.

3. Определены главный магнитный поток на полюсном делении τ индуктора, магнитный поток лобового рассеяния и магнитный поток пазового рассеяния.

4. Установлено, что магнитный поток пазового рассеяния составляет 22%, а лобового рассеяния 7% от главного магнитного потока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Обзор публикаций и патентов показал, что в качестве индукторов МГД-перемешивателей используется односторонняя линейная индукционная машина, устанавливаемая под днищем или с боковой стороны печи.

2. Конструкция обмоток МГД-перемешивателя должна предусматривать достаточную прочность при питании больших токов низкой частоты и возможность воздушного охлаждения.

3. При проектировании конкретного МГД-перемешивателя, на основании исходных данных заказчика, необходимо определить геометрические размеры устройства и его электроэнергетические характеристики.

4. В результате решения одномерной задачи получены параметры схемы замещения МГД-перемешивателя, которые определяются, в основном, двумя величинами: коэффициентом добротности ε и относительным зазором δ / τ .

5. В результате решения двумерной задачи получены параметры схемы замещения, которые определяются большим количеством параметров и учитывают наличие продольного краевого эффекта и дискретное распределение токовой нагрузки.

6. На основании полученных решений одномерной и двумерной задач получены коэффициенты, позволяющие учесть влияние продольного краевого эффекта и дискретного распределения нагрузки на характеристики МГД-перемешивателя.

7. На промышленном МГД-перемешивателе определены главные магнитные потоки, магнитный поток пазового и лобового рассеяния и параметры схемы замещения МГД-перемешивателя.

8. Предложена инженерная методика электрического расчета МГД-перемешивателя жидких металлов.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. МГД технологии в металлургии. Интенсивный курс Специализация IV. Бааке Э., Барглик Д., Лупи С., Никаноров А., Павлов Е., Павлов С., Первухин М., Тимофеев В., Тимофеев С., Хацаюк М., Якович А. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2013. 250с.
2. Применение МГД устройств в металлургии. А.И. Алиферов, Ю.И. Блинов, С.А. Бояков, С.А. Галунин, Е.А. Головенко, Л.П. Горева, Е.С. Кинев, Г.Э. Кирко, И.М. Кирко, В.В. Ковальский, А.В. Комаров, Е.В. Кузнецов, К.А. Михайлов, Е.А. Павлов, С.Ф. Сарапулов, Ф.Н. Сарапулов, В.Н. Тимофеев, В.Н. Федоров. 2007.
3. Электромагнитный перемешиватель жидкого металла: А.С. 1693968 СССР, F 27 D 23/04/ В.Н. Тимофеев, Р.М. Христинич, С.А. Бояков, А.А. Темеров, Л.М. Протопопова и Н.А. Даничева. 1989.
4. Индуктор линейной индукционной машины: А.С. 1809507 СССР, H 02 K 41/025/ В.Н. Тимофеев, Р.М. Христинич, С.А. Бояков, и А.А. Темеров. 1989.
5. Способ электромагнитного перемешивания электропроводных расплавов: А.С. 2113672 СССР, F 27 D 23/04/ В.Н. Тимофеев, Р.М. Христинич, С.А. Бояков, С.А. Рыбаков. 1989.
6. Печь-миксер: А.С. 2465528 Российская Федерация, F 27 B 3/00/ А.И. Корчагин, Е.А. Павлов, С.А. Бояков, В.Н. Тимофеев, Г.Ф. Лыбзиков. 2011.
7. Индукционная установка для перемешивания жидких металлов: А.С. 2524463 Российская Федерация, F 27 D 27/00/ В.Н. Тимофеев, Г.Ф. Лыбзиков, М.Ю. Хацаюк, М.А. Ерёмин. 2012.
8. Проектирование электрических машин. Постников И.М. 2-е изд., перераб. и доп. - К.: Государственное издательство технической литературы УССР, 1960. - 910 с.

9. Электрические машины. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Часть 1, 1987.
10. Электрические машины. Вольдек А. И. 1978
11. Индукционное МГД-устройство для силового воздействия на жидкие металлы: А.С. 1435126 СССР, Н 02 К 44/06/ Смолин Г.К. 1988.

